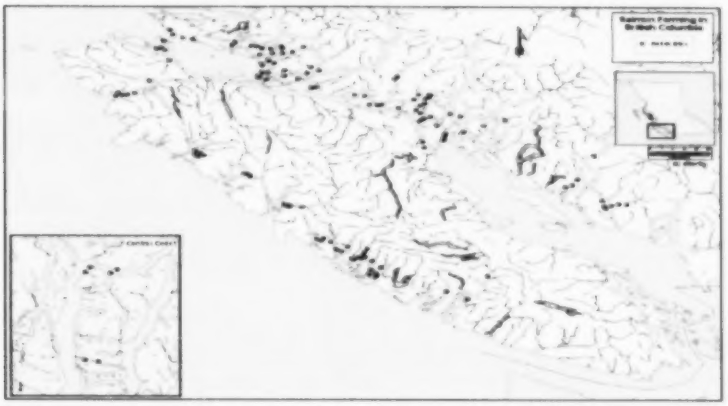
Pêches et Océans Canada | Fisheries and Oceans Canada
Sciences | Science
Région de la capitale nationale
Secrétariat canadien de consultation scientifique
Avis scientifique 2008/001

ÉVALUATION DES TECHNIQUES POTENTIELLES DE SALMONICULTURE EN CIRCUIT FERMÉ ET EN EAU DE MER



Contexte

L'industrie de la salmoniculture et les ministères qui la réglementent sont soumis à des pressions constantes concernant l'introduction de techniques et de pratiques qui réduiront davantage le risque d'interactions négatives entre les installations aquicoles et l'environnement aquatique où elles se trouvent. Les efforts consentis pour étudier ces interactions doivent refléter les préoccupations locales, nationales et mondiales en matière d'impacts environnementaux.

L'élevage en circuit fermé désigne un éventail de techniques dont le but est de restreindre et de maîtriser les interactions entre les poissons d'élevage et l'environnement aquatique entourant les installations ainsi que de limiter les impacts et mieux maîtriser les facteurs associés à la production aquicole. L'élevage en circuit fermé est une entreprise complexe dans lequel plusieurs facteurs doivent être gérés, y compris l'accumulation de CO_2, la gestion des déchets, le choix de l'emplacement ainsi que les besoins en matière d'installations et d'énergie.

Présentement, on ne recense aucun système d'élevage en circuit fermé d'échelle commerciale exploité en environnement marin et réservé exclusivement à l'élevage des saumons. Toutefois, divers composants appartenant à un éventail de techniques d'élevage en circuit fermé ont été mis au point pour le saumon et d'autres espèces afin de résoudre certains problèmes associés à la production et à la maîtrise de l'environnement. Malgré tout, il demeure difficile d'évaluer ces techniques d'une manière intégrée du fait qu'aucune norme n'a été établie et que les renseignements dont on dispose sur le rendement de ces techniques sont limités. Il est donc important que le rendement global de tout système d'élevage en circuit fermé soit évalué sur une échelle de production commerciale.

Des tentatives répétées d'élevage en circuit fermé en milieu terrestre de poissons de taille commerciale ont eu lieu à l'étranger ainsi qu'au Canada. Habituellement, les coûts d'exploitation et les investissements requis sont au nombre des facteurs d'importance qui empêchent l'application viable de ces techniques à la salmoniculture. On a accordé peu d'attention à la mise au point de techniques d'élevage en circuit fermé dans des installations flottantes situées en milieu aquatique. Les seuls travaux qui ont été réalisés étaient axés principalement sur l'élaboration de contenants pour récupérer les déchets et les aliments des poissons.

Les groupes environnementalistes de la Colombie-Britannique continuent de soutenir une transition des systèmes classiques d'enclos en filet vers une forme quelconque d'installations de production de saumon en circuit fermé. Le gouvernement de la Colombie-Britannique a exprimé sa volonté d'évaluer la faisabilité d'une installation pilote de salmoniculture d'échelle commerciale en circuit fermé et en milieu aquatique et d'en partager les coûts.

Mars 2008

Canada

SOMMAIRE

1. L'élevage en circuit fermé désigne un éventail de techniques dont le but est de restreindre et de maîtriser les interactions entre les poissons d'élevage et l'environnement aquatique entourant les installations ainsi que de limiter les impacts et mieux maîtriser les facteurs associés à la production aquicole.

2. En principe, il existe des techniques pour limiter et maîtriser les interactions, mais elles doivent être évaluées par rapport aux coûts qu'elles nécessitent en matière d'atténuation des impacts environnementaux, d'investissements et de paramètres d'exploitation, facteurs qui varient d'un site à l'autre.

3. Après avoir examiné plus de 40 systèmes d'élevage en circuit fermé répertoriés un peu partout dans le monde, on a constaté qu'aucun ne servait à produire exclusivement des saumons atlantiques adultes et que de nombreuses tentatives à cet égard s'étaient soldées par un échec. Les raisons de ces échecs étaient nombreuses et souvent interreliées (p. ex., bris mécaniques, rendement médiocre des poissons, problèmes de gestion, chute des prix sur les marchés et financement inadéquat).

4. Cinq types de systèmes de production sont décrits et examinés : a) l'enclos en filet classique; b) le système d'élevage en circuit fermé flottant à parois rigides; c) le système d'élevage en circuit fermé flottant à parois souples; d) le système terrestre à circulation d'eau continue; e) le système terrestre à eau recyclée.

5. Les défis techniques associés aux divers concepts de systèmes d'élevage en circuit fermé flottants ont été modélisés. Les systèmes faits de matériaux rigides en ancrés au fond présentent des défis particuliers en ce qui concerne les courants de marée et la hauteur des vagues lorsqu'ils sont déployés dans des zones exposées – le choix de l'emplacement pour ces types de structures peut donc être limité par ces deux facteurs océanographiques. Les domaines de la construction navale et des formes des coques pourraient amener des solutions techniques. Des systèmes terrestres à parois rigides dans lesquels l'eau est recyclée, connus sous le nom de systèmes aquicoles à recirculation, sont utilisés pour l'élevage de poissons de valeur commerciale élevée qui peuvent être élevés en eau douce, en eau saumâtre ou en eau de mer. Ces systèmes sont également prometteurs pour l'élevage de saumons en eau douce ou en eau saumâtre en raison du grand potentiel de réduction des coûts énergétiques associés au pompage de l'eau de mer. En outre, les besoins en eau grandement réduits des systèmes aquicoles à recirculation peuvent permettre aux exploitants d'engager des dépenses supplémentaires pour la désinfection des influents ou des effluents afin de réduire la transmission des agents pathogènes. Toutefois, une évaluation critique du potentiel d'élevage du saumon atlantique en eau douce/saumâtre doit être effectuée.

6. En consultant la littérature scientifique, on a établi des paramètres de qualité de l'eau pour l'élevage de saumons atlantiques en santé. Toutefois, reste à évaluer si les techniques disponibles peuvent adéquatement respecter ces normes en eau salée avec des poissons de 5 kg ou plus. Les normes elles-mêmes doivent également être validées en pratique.

7. Il faut effectuer d'autres travaux pour évaluer les aspects du bien-être des saumons selon des densités d'élevage supérieures à celles utilisées actuellement.

8. Les changements dans l'environnement de production associés aux techniques d'élevage en circuit fermé, y compris l'augmentation de la densité des poissons et les temps de rétention de l'eau, pourraient accroître le risque d'exposition à des agents pathogènes et la transmission horizontale de ceux-ci par rapport aux systèmes actuels. Des évaluations du risque de maladies et la surveillance quantitative du mouvement des agents pathogènes, tant dans les systèmes fermés qu'à l'intérieur et à l'extérieur de ceux-ci, doivent être effectuées afin que l'on puisse établir les points de contrôle critiques. Cette information pourrait ensuite être utilisée pour la mise en œuvre, de façon plus précise, de procédures et de techniques visant à réduire le mouvement des agents pathogènes et le risque de maladie.

9. Les impacts environnementaux associés à l'aquaculture en enclos en filet et aux autres systèmes d'élevage en circuit fermé doivent être évalués à fond afin que l'on dispose d'un cadre pour évaluer le rendement environnemental des divers systèmes et, ensuite, fournir des avis aux gouvernements concernant la recherche et le développement sur des techniques potentielles.
10. Un groupe collégial de parties intéressées cumulant un vaste éventail d'expertise et d'opinions a été établi pendant le processus du SCCS. Ce groupe doit être mis à contribution et consulté pour résoudre les questions complexes des techniques d'aquaculture en circuit fermé.

INTRODUCTION

Le but de l'atelier du SCCS tenu à Sidney, C.-B., du 29 au 31 janvier, était de passer en revue une série de documents de travail portant sur les techniques de pisciculture en circuit fermé et d'élaborer un avis scientifique à cet égard. La documentation provenant de ce processus inclusif doit servir à éclairer Pêches et Océans Canada, d'autres ministères et agences du gouvernement fédéral, les gouvernements provinciaux, les Premières nations, l'industrie et la communauté environnementale pour l'élaboration de techniques d'élevage en circuit fermé applicables à la salmoniculture commerciale. La réunion avait également pour but d'informer les autres parties intéressées des autres techniques d'élevage.

Pour procéder à cet examen, le ministère créait, en juin 2007, un comité directeur constitué de représentants d'universités, du gouvernement, de l'industrie, d'organisations non-gouvernementales et des Premières nations. Ce comité a été chargé d'élaborer des objectifs et un calendrier pour l'examen des techniques d'élevage en circuit fermé. Le comité a reconnu l'importance de l'innovation continue et a établi des jalons pour passer en revue les techniques, les approches et les systèmes qui pourraient potentiellement améliorer les pratiques actuelles.

Les principaux enjeux liés aux intrants et aux extrants ainsi que d'autres facteurs connexes qui peuvent être maîtrisés dans les exploitations aquicoles sont précisés au tableau 1.

Tableau 1 : Liste des enjeux

Enjeux liés aux intrants de l'aquaculture	***Enjeux liés aux extrants de l'aquaculture***	***Autres facteurs connexes***
Parasites	Parasites	Disponibilité des sites
Agents pathogènes	Agents pathogènes	Stocks de poissons sauvages
Stock de départ	Échappées	Phoques et otaries
Énergie		Qualité des ressources marines
Aliment		Poussées algales nocives
Qualité de l'eau	Qualité de l'environnement	
Oxygène	CO_2	Encrassement biologique
Température	Déchets solides	Défaillance des systèmes/dispositifs de secours
	Déchets solubles	
		Économie fiscale

L'examen avait les objectifs précis suivants.

1) Définir les forces et les faiblesses des divers systèmes et techniques dans le contexte de leur utilisation potentielle pour l'élevage de saumons en circuit fermé à une échelle commerciale.
2) Relever les paramètres de rendement et les critères à utiliser pour l'évaluation des concepts, du rendement biologique et écologique, des coûts connexes (dépenses d'investissement et coûts variables) et du soutien logistique à utiliser dans les analyses économiques subséquentes.
3) Établir quels sont les processus nécessaires pour assurer la qualité de l'eau afin d'optimiser la croissance et le bien-être des poissons, tout en limitant les effets sur l'environnement aquatique externe.
4) Consigner par écrit et évaluer les techniques actuelles qui peuvent s'appliquer à chaque processus (composante) et évaluer l'incidence de chaque technique sur la dynamique du système.
5) Fournir un contexte technique pour faciliter l'intégration du système et la planification expérimentale pour la recherche future et les projets pilotes.
6) Élaborer une « analyse des écarts » que l'on pourra utiliser pour évaluer les besoins futurs concernant la recherche sur l'élevage en circuit fermé.
7) Constituer une base de connaissances sur laquelle on pourra fonder une analyse économique de l'élevage en circuit fermé.
8) Instaurer un dialogue avec l'industrie, les ONGE, les gouvernements, les Premières nations et les universités.

Six documents ont été examinés au cours de l'atelier.

- Examen des expériences passées.
- Évaluation technique de la conception et du fonctionnement des systèmes d'élevage en circuit fermé.
- Analyse comparative des exigences biologiques de la production de salmonidés selon diverses densités dans des systèmes en circuit fermé.
- Évaluation et examen de la transmission potentielle d'agents pathogènes et de parasites entre les systèmes d'élevage en circuit fermé et l'environnement externe.
- Évaluation technique des processus qui maintiennent la qualité de l'eau pour une croissance et une santé optimale des poissons (systèmes de gestion des gaz, systèmes de captage des déchets solides et solubles, systèmes de désinfection, systèmes de secours et réservoirs d'élevage).
- À la lumière des conclusions des cinq documents ci-devant, conceptualiser une série de systèmes intégrés qui pourraient être utilisés dans un projet pilote ou un élevage modèle.

ÉVALUATION

1. Examen des expériences passées

Ce document passe en revue plus de 40 études de cas dans lesquelles divers types de techniques d'élevage en circuit fermé ont été mises à l'essai pour la production commerciale de poissons, y compris le saumon atlantique. Quatorze de ces installations sont toujours exploitées, mais aucune ne sert exclusivement à l'élevage du saumon atlantique. L'étude révèle que les systèmes terrestres à circulation d'eau de mer continue n'ont pas donné les résultats escomptés pour le saumon atlantique en raison d'un certain nombre de facteurs, dont des coûts

d'exploitation élevés, des modèles d'affaires exagérément optimistes, des problèmes techniques reliés à la nécessité d'une capacité de refoulement élevée (> 8 m) pour le pompage de l'eau de mer, l'encrassement des tuyaux et les bris imprévus des systèmes.

On recense des exemples de systèmes terrestres avec circulation d'eau douce continue utilisés pour la production commerciale de saumons, de truites et de tilapia juvéniles. Ces systèmes sont caractérisés par un approvisionnement en eau de qualité abondant et par gravité, ce qui élimine la nécessité du pompage et permet souvent l'utilisation de l'eau de façon séquentielle dans une série de bassins allongés disposés en terrasses.

Des systèmes terrestres d'élevage en circuit fermé et à recirculation ont été utilisés avec succès pour la production de truites (Danemark), de saumoneaux et d'espèces de valeur marchande élevée autres que le saumon. Les systèmes aquicoles à recirculation sont les seuls systèmes qui, de façon pratique, peuvent isoler complètement les poissons d'élevage de l'environnement naturel. Les exemples de systèmes aquicoles à recirculation étudiés étaient surtout des systèmes à eau douce ou à eau de mer utilisés pour élever des espèces de valeur marchande élevée, comme le flétan. Ces systèmes produisent en général moins de 1000 tonnes métriques (t) par année, et leur expansion est susceptible d'occasionner d'autres problèmes techniques et opérationnels que l'on ne peut anticiper pleinement à partir de l'expérience actuelle. Les systèmes aquicoles à recirculation n'ont pas été éprouvés pour les saumons adultes, mais ont été utilisés avec des saumoneaux. En Chine, on a tenté d'utiliser un système aquicole à recirculation pour élever des saumons atlantiques. L'initiative a été abandonnée en 2007. On a également appris que les systèmes aquicoles à recirculation utilisés présentement en Chine pour l'élevage du flétan sont touchés par des difficultés techniques.

Mis à part les systèmes aquicoles à recirculation, tous les systèmes examinés sont du type à circulation d'eau continue. Les systèmes flottants à circulation d'eau continue ont donné de piètres résultats notamment en raison de bris mécaniques ou matériels. Les systèmes flottants à circulation d'eau continue et à parois rigides n'ont pas encore été mis à l'essai pour la production commerciale, mais l'un de ceux-ci fera l'objet d'essais sous peu.

On recense quelques tentatives d'élevage de poissons dans des navires transformés ou des structures semblables à un navire, mais très peu de documentation existe sur le rendement de tels systèmes. Deux essais ont eu lieu en France; celui sur le saumon s'est soldé par un échec. Un navire ferme a été nouvellement mis en service pour la production de saumons en Turquie. Parmi les contraintes potentielles associées à de tels systèmes, mentionnons des coûts en capitaux élevés pour l'érection d'une structure neuve ou la transformation d'un navire et d'importants coûts d'exploitation non liés à l'aquaculture. Parmi les problèmes techniques éventuels, mentionnons l'intégrité structurelle, la maîtrise de la houle intérieure et la réaction des poissons.

En ce qui concerne la capacité des systèmes à limiter les échanges et les impacts avec l'extérieur, on trouve peu de données précises, même si une fourchette de problèmes pratiques ont été relevés. L'un des éléments clés de la réussite d'un système d'élevage en circuit fermé est la capacité d'établir et de maintenir de faibles concentrations d'agents pathogènes. Des techniques établies à partir d'autres industries de production animale et des procédures d'exploitation normale peuvent être utilisées comme outils de sécurité biologique pour empêcher l'introduction ou la propagation d'agents pathogènes obligatoires des poissons dans les systèmes d'élevage en circuit fermé. Cela pourrait favoriser le bien-être, la croissance et la survie des poissons, tout en limitant le recours aux produits chimiothérapeutiques et aux antibiotiques.

Selon différents élevages de saumons et d'autres systèmes d'élevage de poissons, une maîtrise environnementale supplémentaire et une gestion plus efficace peuvent favoriser la production à des densités supérieures à celles utilisées couramment dans les systèmes avec enclos en filet. Toutefois, les problèmes de bien-être des poissons peuvent devenir plus critiques, et le but doit être d'optimiser la production sans compromettre la santé et le bien-être des poissons.

En général, le fait de passer d'un mode de gestion passive des conditions d'élevage à un mode de gestion active amène un accroissement de la complexité des contrôles des procédés. Les entreprises, les recommandations et les règlements futurs devront être explicites quant aux conditions d'élevage particulières qu'elles essaient de maîtriser. Le terme « élevage en circuit fermé » est trop large pour les techniques de contrôle émergentes et en évolution disponibles ou mises au point. Contrairement aux techniques d'élevage en cage marine qui ont évolué par le truchement de nombreux cycles d'échecs et d'améliorations et qui affichent maintenant une certaine similitude et qui sont bien établies un peu partout dans le monde, les techniques d'élevage en circuit fermé sont variées et témoignent d'une recherche de concepts toujours active et diversifiée.

De façon générale, les systèmes passés en revue n'ont pas été conçus avec l'objectif premier d'atténuer des impacts environnementaux particuliers, mais plutôt avec le but d'offrir une plus grande maîtrise des conditions d'élevage. Les échecs commerciaux associés à divers systèmes d'élevage en circuit fermé s'expliquent par une foule de raisons, dont un mauvais choix d'emplacement, un concept incorrect, une mauvaise gestion et des facteurs liés aux marchés mondiaux. La viabilité de ces techniques passe par l'amélioration du rendement, et il faudra également tenir compte de l'ensemble des impacts environnementaux.

En C.-B., la pratique consistant à peupler un site au début d'un cycle de production et d'y élever les poissons jusqu'à la récolte (élevage par lots distincts) est justifiée par l'obligation imposée à l'industrie par le cadre réglementaire actuel. Les permis des installations avec cage en filet prévoient une biomasse maximale échelonnée sur un cycle de production de 22 à 26 mois. Les permis délivrés en Norvège prévoient quant à eux une biomasse présente maximale. Le cadre réglementaire influe sur les options et les choix en matière de peuplement et, de ce fait, sur l'efficacité de production de la capacité installée – toute comparaison à l'échelle mondiale doit donc tenir compte de ces contraintes.

Il faut davantage d'information sur les échecs de certains systèmes et sur la réussite d'autres systèmes afin d'établir les paramètres à adopter ou à modifier pour maintenir et améliorer le rendement des systèmes. Il faut, par exemple, apprendre à atténuer et à maîtriser le flux du dioxyde de carbone, la capacité assimilative de l'eau douce, qui est inférieure à celle de l'eau de mer et les conséquences des rejets possibles dans l'environnement. Il faut aussi apprendre à comparer les coûts de l'élevage de lots distincts dans des enclos en filet à l'introduction progressive de poissons dans les systèmes aquicoles à recirculation. L'étude d'un système d'élevage en circuit fermé à recirculation de la firme norvégienne Aqua Optima a démontré que le changement de la fréquence de peuplement (de trois à douze fois par année) pouvait avoir un impact positif majeur sur l'efficacité de l'exploitation.

Un certain nombre d'autres points sont soulevés pendant les discussions. Il ne faut pas ignorer les leçons apprises et il est important de bien documenter les réussites et les échecs. Les réussites sont-elles associées aux techniques ou au fait que des coûts d'investissement élevés au démarrage ont été absorbés par une ou plusieurs autres faillites? Sans aucun doute, la connaissance et l'expérience des prédécesseurs constituent un actif inestimable. Les systèmes doivent être hautement fiables en tout temps du fait que la survie des poissons est entièrement dépendante de dispositifs mécaniques pour l'approvisionnement en eau et le traitement de

celle-ci. En général, la capacité des systèmes diminue avec l'augmentation du poids moyen des poissons élevés. Qui plus est, lorsque la densité de population augmente, le temps de réponse des systèmes de secours devient plus court. Les systèmes doivent être bien conçus et doivent avoir un excellent historique de fonctionnement pour être acceptés par les assureurs commerciaux (aucune protection pour l'incompétence). Souvent, un optimisme exagéré dans les plans d'affaires a mené à un échec; il faut donc bien vérifier ces plans ou les comparer aux normes de l'industrie. L'évaluation du risque doit établir un lien avec l'importance de l'investissement. La production intégrée et intensive de poissons et de végétaux s'est soldée par un échec dans les deux exemples examinés; toutefois, ces systèmes fonctionnaient lorsque les déchets ont été utilisés pour l'irrigation en agriculture. Finalement, la possibilité d'atteindre un indice de transformation alimentaire < 1 avec un système d'élevage en circuit fermé dans lequel l'environnement peut être maîtrisé doit être évaluée. Les conditions naturelles sont reflétées de façon plus complète dans les enclos en filet.

2. Évaluation technique de la conception et du fonctionnement des systèmes d'élevage en circuit fermé

La stabilité structurelle de quatre configurations de réservoirs cylindriques en béton flottants et interreliés a été analysée selon l'hypothèse d'une profondeur d'eau de 20 mètres et à l'aide de données historiques sur la hauteur des vagues, la hauteur de la houle et la vélocité des courants mesurés à différents emplacements dans le détroit de Georgia. Selon la taille et l'espacement des réservoirs cylindriques, le courant ambiant (p. ex., entre les cylindres) pourrait être accéléré par les structures et ainsi créer de plus grandes vélocités à l'intérieur et en dessous de la ferme. Il faut avoir recours à des outils de modélisation robustes pour exécuter une analyse technique appropriée. Par exemple, le coefficient de traînée d'un groupe de cylindres circulaires peut être plus élevé que celui d'un seul cylindre circulaire. Dans le cas des cylindres de grand diamètre, la charge imposée par la diffraction des vagues pourrait être considérée. Les forces appliquées seront fonction de la hauteur des vagues, de la longueur et de la profondeur du site, et seront également tributaires des interactions entre les courants de marée et la charge appliquée par les vents. Les caractéristiques des forces spécifiques et localisées seront quant à elles fonction du nombre de cylindres, de leur taille et de leur espacement.

D'après l'évaluation initiale, d'autres études s'imposent si l'on veut analyser des approches de modélisation numérique et physique préalables à la mise en place de structures à parois pleines dans un environnement où l'énergie des vagues est élevée. L'analyse des systèmes d'amarrage est aussi importante dans le dimensionnement des installations d'élevage. Dans cette analyse, les contraintes des unités d'élevage en circuit fermé en béton sont étudiées du fait que les propriétés du matériau sont bien connues. D'autres matériaux, y compris l'aluminium, la fibre de verre et le polyéthylène, devraient également être étudiés. L'affouillement sous les structures ainsi que les systèmes d'amarrage peuvent avoir d'importantes conséquences sur l'environnement benthique qu'il faut prendre en considération. Les grosses unités (> 20 m de diamètre) pourraient avoir besoin d'influents et d'effluents multiples pour maintenir la qualité de l'eau et le bien-être des animaux grâce à une hydrodynamique interne appropriée.

Les ensembles de réservoirs rigides cylindriques devraient réagir d'une manière hautement dynamique sous l'effet des vagues de surface. La résonance peut constituer un problème majeur lorsque la fréquence des vagues s'approche de la fréquence naturelle des cylindres flottants. En outre, si la longueur des vagues est similaire aux dimensions de la ferme, les mouvements engendrés peuvent occasionner de fortes contraintes dans les éléments reliant les composants de l'installation d'élevage entre eux (p. ex., organes de liaison, passerelles et

composants de systèmes auxiliaires). Les grandes forces interactives peuvent servir à optimiser la sécurité si l'on déploie les unités de façon autonome et distincte ou si on les relie les unes contre les autres, avec peu ou pas de mouvements au niveau des organes de raccordement.

L'aménagement de réservoirs de contention à l'intérieur d'un navire ou d'un assemblage d'unités semblables à un navire est un autre système sur lequel on peut se pencher. On a déjà utilisé des navires pour élever des poissons, notamment des flétans à l'intérieur d'un cargo. Cette installation n'est plus utilisée maintenant; il faut que l'on sache pourquoi. Techniquement, il est également possible de placer ou d'appuyer des structures sur le fond marin. Toutefois, cela pourrait avoir un impact permanent sur l'habitat des poissons benthiques comparativement aux impacts passagers et variables des ensembles de filets utilisés actuellement.

Plusieurs autres questions sont également considérées comme pertinentes. Le recouvrement des cylindres peut se révéler nécessaire du fait qu'un remplissage excessif dû à l'action des vagues pourrait accroître l'instabilité de l'installation. En outre, selon les niveaux d'eau et la résistance des parois, un mécanisme peut être requis pour équilibrer la pression à l'intérieur et à l'extérieur des cylindres rigides afin de compenser l'action des vagues autour de la structure. Sans un tel mécanisme, l'instabilité du système sera accrue, ce qui pourrait entraîner un échange d'eau avec l'environnement. La flottaison des réservoirs est une autre des questions soulevées. Les calculs doivent tenir compte du poids des aliments, de la mortalité de masse des saumons adultes, de la neige humide et du poids de l'encrassement biologique accumulé. Si une forme quelconque de traitement de l'eau est envisagée, il faudra concevoir et établir les dimensions des unités annexes et de leurs structures. Finalement, il faudrait se pencher sur les méthodes d'entretien, de récupération et de déclassement des structures.

3. Analyse comparative des exigences biologiques de la production de salmonidés selon diverses densités dans des systèmes en circuit fermé

Le coefficient de croissance thermique (CCT), qui est en pratique indépendant de la masse et de la température corporelles, constitue un moyen objectif de comparer les taux de croissance. Les valeurs moyennes pour l'industrie en Norvège, au Chili et en Écosse varient de 2,4 à 2,5. Peu importe depuis quand la sélection est pratiquée, les valeurs de l'industrie sont demeurées inférieures aux valeurs théoriques de 2,7 ou plus obtenues en laboratoire, ce qui laisse sous-entendre que la croissance en milieu commercial pourrait être améliorée. On peut s'attendre à un indice de transformation alimentaire d'environ 1 dans des conditions d'élevage en circuit fermé, sauf que les études menées avec de petits réservoirs, où l'on a constaté un indice de transformation alimentaire était égal ou inférieur à 1, peuvent ne pas s'appliquer aux grandes enceintes.

Selon un excellent examen de la littérature récente, les conditions acceptables sur le plan de la qualité de l'eau pour maintenir la croissance et le bien-être des saumons atlantiques au stade post-saumoneau en eau de mer sont les suivantes : saturation en oxygène > 80 %; dioxyde de carbone < 10 mg/L; ammoniaque < 0,012 mg/L. Toutefois, il faut mener d'autres recherches sur les interactions entre les différents paramètres de qualité de l'eau. Même si la consommation d'oxygène est fonction de la masse corporelle, de la température et du taux d'alimentation (augmente de 30 à 50 % après l'alimentation), de la vélocité natatoire et des niveaux de stress, une saturation en oxygène de 80 % constituerait un seuil minimal acceptable. Néanmoins, il faut quantifier les effets de la saturation en oxygène par rapport au coût à engager. Dans les systèmes en circuit fermé, la concentration d'oxygène ou de dioxyde de carbone demeure certes importante, mais la vitesse à laquelle ces valeurs varient l'est tout aussi. Le CO_2 pénètre

rapidement dans le corps des poissons et modifie instantanément le pH. Les saumons s'adaptent aux changements de pH en ajustant les concentrations de bicarbonate ou de chlore, mais ce processus prend du temps, jusqu'à 24 heures dans le cas du saumon. Ainsi, un changement subit des concentrations de CO_2 peut entraîner la mort, peu importe la concentration. Une chute de la saturation en oxygène peut entraîner l'arrêt de l'alimentation. Une augmentation du taux de renouvellement de l'eau peut contribuer à résoudre de tels problèmes, mais cela peut occasionner d'autres problèmes, notamment obliger les poissons à nager plus rapidement. La production d'ammoniaque est d'environ 0,04-0,06 g par gramme d'oxygène consommé et, même si le taux de croissance ne semble pas être affecté par ce déchet lorsque le débit d'eau est adéquat pour assurer l'approvisionnement en oxygène, on observe un stress mesurable à une concentration d'ammoniaque > 0,012 mg/L dans l'eau de mer. Les nitrites peuvent s'accumuler jusqu'à des concentrations toxiques dans les systèmes aquicoles à recirculation, dans lesquels la concentration recommandée est < 0,5 mg/L. Il faudra mener des recherches sur les seuils relatifs aux nitrates (habituellement établis à 300 mg/L) pour étayer leur lien avec les expositions chroniques. Les particules et les bactéries hétérotrophiques s'accumulent dans les systèmes en circuit fermé et affectent les processus respiratoires et autres, mais leurs impacts n'ont pas été quantifiés de façon précise ni associés à d'autres facteurs affectant la respiration.

Selon les études à petite échelle antérieures, la densité maximale de saumons atlantiques sans affecter le taux de croissance est de 80 kg/m^3. Il faudra effectuer d'autres études pour déterminer si cette densité s'applique également aux unités de production à grande échelle et quelles sont les conséquences pratiques du maintien de densités élevées dans de grands réservoirs. La densité peut également avoir une incidence sur le taux de croissance et la variation des tailles. Il faudra ici aussi effectuer d'autres recherches pour étudier la réaction à des densités supérieures dans les systèmes d'élevage en circuit fermé. Il existe également des inconnues en ce qui concerne l'homogénéité spatiale de la qualité de l'eau. Selon le régime hydraulique dans les réservoirs, les poissons se trouvant dans la partie supérieure de la colonne d'eau des grands systèmes peuvent, par exemple, se trouver dans de l'eau contenant plus d'oxygène et moins d'ammoniaque. En conséquence, il est important de garder ces paramètres le plus homogène possible dans toute l'enceinte à l'aide de solutions techniques. Il faut également mener d'autres recherches pour étudier les impacts qu'ont les conditions d'élevage à haute densité sur le bien-être des poissons.

Il faut mener une évaluation critique des possibilités d'élevage du saumon atlantique en eau douce et en circuit fermé. Les saumons coho et rouge peuvent être élevés en eau douce, et des essais ont démontré qu'une fois une période de pertes légèrement plus élevées au stade saumoneau, le saumon atlantique peut atteindre sa maturité en eau douce. Une eau de faible salinité apporte de nombreux autres avantages pour l'élevage en circuit fermé, notamment en réduisant l'occurrence de certaines infections pathogènes comme les poux de poisson et la pourriture de la bouche et en permettant l'utilisation de systèmes de désinfection à l'ozone, mais engendre également un plus grand potentiel d'infection fongique. L'utilisation périodique de sel dans les élevages en eau douce, soit sous la forme d'eau de mer pure ou diluée, permet de tirer profit des propriétés prophylactiques du sel et de réduire le stress dû à la manutention. Cet outil d'élevage pratique peut être utile pour les poissons tolérant l'eau salée tels que le saumon. Il conviendrait de se pencher sur certains commentaires concernant le degré et les options de gestion pour la maturation hâtive des saumons élevés en eau douce.

4. Évaluation et examen de la transmission potentielle d'agents pathogènes et de parasites entre les systèmes d'élevage en circuit fermé et l'environnement externe

Certaines techniques d'élevage en circuit fermé permettent de quantifier et de manipuler avec plus de précision les intrants et les extrants et de raffiner les pratiques de gestion de la santé et de biosécurité et rehaussent le niveau de la gestion des maladies. Elles peuvent permettre une prévention et un traitement plus efficaces des maladies et pourraient faire l'objet de recherches lorsque des expériences et une surveillance sur le terrain peuvent être effectuées pour recueillir des données sur les concentrations réelles d'agents pathogènes qui entrent dans les installations d'élevage en circuit fermé, qui s'y trouvent et qui en sont rejetées.

La déclaration d'une maladie infectieuse est le résultat d'une combinaison de facteurs en plus d'une exposition à un agent pathogène (voie de transmission, dose, etc.) et inclut la condition de l'hôte, de la population hôte et de l'environnement. L'exposition à un agent pathogène ne mène pas nécessairement à une infection, et une infection ne mène pas toujours à une maladie mesurable ou ayant des symptômes cliniquement observables.

La gestion des maladies comprend la prévention (c.-à-d., les pratiques d'élevage, les caractéristiques du site et la sélection du stock), les mesures de contrôle (c.-à-d., la biosécurité) et le traitement. La sélection des souches peut être une bonne stratégie préventive pour réduire les maladies et le stress. Cette approche est utilisée en Norvège et peut être appliquée au Canada.

En Colombie-Britannique, les maladies infectieuses provoquées par le pou de poisson, *Kudoa* et la NHI ainsi que les maladies non infectieuses causées par des proliférations de planctons et de faibles concentrations d'oxygène dissous soulèvent des préoccupations. Il est possible d'apporter des améliorations aux régimes de gestion des systèmes d'élevage en circuit fermé du fait que l'eau peut théoriquement être prise à des profondeurs où les concentrations de ces agents pathogènes nocifs sont susceptibles d'être moins élevées. Cependant, on ne dispose pas des techniques appropriées pour assurer la détection rapide de tels agents pathogènes, et certains agents pathogènes peuvent être présents à des concentrations supérieures dans des eaux plus profondes. L'amélioration de la concentration d'oxygène moyenne peut être obtenue par une combinaison de surveillance et d'injection d'oxygène à l'eau d'entrée.

Il est possible que les pratiques d'élevage et de biosécurité utilisées présentement doivent être ajustées pour les systèmes d'élevage en circuit fermé. La fréquence des maladies causées par des pathogènes opportunistes (maladies de production) susceptible d'être associée aux pratiques d'élevage intensives en circuit fermé doivent être étudiées davantage. Les temps de rétention de l'eau sont un facteur important, car les temps de rétention des particules sont accentués lorsque le renouvellement de l'eau est réduit, ce qui peut accroître l'exposition aux agents pathogènes. La situation peut même empirer si les particules sont retenues et accumulées de façon séparée.

Pour atténuer la transmission des maladies, on propose de mettre l'accent sur le maintien de poissons commercialisables en santé dans les enceintes. Le présent document propose des pratiques d'élevage et de gestion de la santé et de la biosécurité révisées en tant que principaux moyens pour interrompre le mouvement des agents pathogènes qui entrent et qui sortent des enceintes. Il faut colliger de l'information quantitative concernant l'entrée, la présence et la sortie des agents pathogènes dans les enclos d'élevage en circuit fermé et effectuer des évaluations des risques de maladie. Cette information pourrait ensuite contribuer à identifier les points de contrôle critiques que l'on pourrait par la suite utiliser pour établir de

façon plus précise et mettre en œuvre des procédures et des techniques supplémentaires pour réduire les mouvements des agents pathogènes (le risque de maladies), c.-à-d. des techniques de désinfection (UV, ozone) et des systèmes de filtration (barils de filtration). Il serait prématuré de proposer toute forme de techniques de désinfection (coûteuse) (c.-à-d., UV, ozone ou barils de filtration) en raison de l'incertitude quant à l'emplacement des points de contrôle critiques (c.-à-d., influents versus effluents) et à l'identité des agents pathogènes ou des maladies qu'il faudrait combattre.

D'après le rapport de la réunion du SCCS tenue à Sidney, lorsque l'interruption active de la transmission des agents pathogènes est requise, il faut logiquement cibler des techniques de réduction des concentrations d'agents pathogènes dans le flux d'eau d'entrée et non nécessairement dans l'effluent. L'influent est habituellement moins coûteux à traiter du fait qu'il contient moins de matières organiques que l'effluent. On souligne que si les animaux sont en santé et non exposés à des maladies, ils ne pourront transmettre celles-ci à l'environnement externe. On souligne également que l'effluent pourrait faire l'objet d'une surveillance afin que l'on puisse vérifier l'efficacité de cette approche et évaluer la nécessité d'un traitement supplémentaire. Aucun consensus n'est obtenu sur cette question.

La relation entre un pathogène, l'hôte et l'environnement marin doit être évaluée pour les systèmes d'élevage en circuit fermé. Il faudra effectuer une évaluation du risque de maladies afin de déterminer les points de contrôle qui peuvent être propres à chaque exploitation. Par exemple, si le pou de poisson est jugé comme étant un risque et qu'il devient nécessaire de réduire les rejets de poux de poisson, un baril de filtration de 200 microns pour traiter l'influent/effluent pourrait théoriquement enlever tous les stades de développement de ce parasite, sauf les œufs. Un filtre de 200 microns ne serait pas efficace contre les petits agents pathogènes (p. ex., bactéries et virus), à moins qu'ils n'adhèrent à des matières en suspension de plus grande taille.

Le traitement des influents/effluents à l'ozone et aux UV constitue la méthode de désinfection la plus applicable. On discute de la possibilité d'utiliser l'acide peracétique. L'ozone pourrait permettre une réduction d'un ordre de grandeur de cent des concentrations d'agents pathogènes et pourrait équivaloir à la moitié des coûts des autres systèmes, sans aucune filtration, et pourrait être utilisé avec de l'oxygène pur.

L'application d'ozone à faibles doses peut réduire les concentrations d'agents pathogènes en-deçà du point auquel la formation de composés bromés toxiques devient un risque, mais il faut vérifier ce point. Les rayons UV présentent l'avantage de ne poser aucun risque de surdose, mais on s'attend à ce que cette solution soit très coûteuse et qu'il soit difficile d'obtenir un traitement fiable dans des conditions réelles en raison des fines particules présentes dans l'eau des installations d'élevage. Néanmoins, une réduction intéressante de la charge en agents pathogènes pourrait être possible du côté des influents non filtrés affichant une faible charge particulaire (par rapport à l'eau de culture); cette allégation doit être vérifiée et validée sur le terrain. Pour une élimination efficace des agents pathogènes, une pré-filtration peut être requise lorsque l'on utilise un traitement aux UV afin d'éviter la diffusion du rayonnement, la perte de l'énergie UV et « l'effet de dissimulation » qui survient lorsque les agents pathogènes demeurent à l'ombre des particules fines. Les barils ou autres filtres sont conçus pour remplir ce rôle, mais pour obtenir une capacité adéquate capable de traiter les débits des installations de production, l'investissement sera important et il faudra des dispositifs de très grande dimension. Les traitements à l'ozone et aux UV peuvent être incompatibles avec les exploitations éloignées en mer en raison de leur forte demande énergétique. La valeur du fractionnement à l'aide d'une mousse pour éliminer les agents pathogènes des systèmes d'élevage en circuit fermé doit être étudiée.

L'élevage en circuit fermé pourrait permettre l'exécution de traitements par trempage contre les maladies; toutefois, l'élimination sécuritaire des eaux de traitement provenant de ces grandes enceintes doit également être prise en considération. L'orientation et l'emplacement des prises d'eau et des points de rejet sont également des facteurs pertinents. À moins que les effluents ne soient complètement traités, une séparation efficace entre les points de prise d'eau et de rejet d'eau est essentielle si l'on ne veut pas que les effluents soient captés directement par les prises d'eau.

L'interruption la plus complète des échanges d'agents pathogènes entre une installation d'élevage en circuit fermé et l'environnement externe n'est vraisemblablement possible qu'avec un système terrestre à recirculation intégrale. Le volume de l'influent et de l'effluent peut être suffisamment petit pour permettre l'utilisation de techniques plus avancées donnant un niveau de désinfection quasi égal à la stérilisation.

5. Évaluation technique des processus qui maintiennent la qualité de l'eau pour une croissance et une santé optimale des poissons

Un examen comparatif de dix systèmes de production disponibles dans le commerce est mené à l'aide d'études de concepts sur chaque système avec un objectif de production de 2 500 t de saumons atlantiques en deux ans. Tous ces systèmes à eau de mer devaient respecter les limites de qualité de l'eau précisées pour la salmoniculture intensive dans le document 3, à savoir : CO_2 dissous < 10 mg/L; O_2 dissous > 80 -100 % de saturation; azote total sous forme ammoniacale (NH_3-N) < 0,0125 mg/L; nitrites totaux (NO_2-N) < 0,5 mg/L.

Cinq types de systèmes de production ont été examinés : a) enclos en filet classique; b) systèmes d'élevage en circuit fermé à parois rigides; c) systèmes d'élevage en circuit fermé à parois souples; d) systèmes terrestres à circulation d'eau continue; e) système terrestre à recirculation.

Trois possibilités sont considérées pour le système d'élevage en circuit fermé à parois rigides : 1) sans aération; 2) avec aération diffuse; 3) avec injection d'oxygène pur.

Quatre possibilités sont considérées les systèmes terrestres à circulation d'eau continue : 1) aération de l'influent avec colonne filtrante, réservoirs dans une pente; 2) aération de l'influent avec colonne filtrante, réservoirs dans le sol; 3) réservoirs dans le sol, injection d'oxygène pur, drain double, eau du fond vers l'étang de décantation; 4) réservoirs dans le sol, injection d'oxygène pur, drain double, eau du fond vers un baril de filtration, eau de lavage à contre-courant vers l'étang de sédimentation.

Le seul système à recirculation examiné est inspiré en grande partie du système Aqua Optima offert sur le marché.

Les aspects techniques de ces systèmes sont présentés au tableau 2.

1 Utilisation d'une installation classique comportant 12 enclos en filet comme système de référence pour toutes les autres comparaisons. Les courants naturels apportent de l'eau douce oxygénée et dissipent les déchets solubles. Les déchets solides se déposent sous le site.

2A Système de mariculture SARGO pour l'élevage des poissons en circuit fermé, à parois rigides et à circulation d'eau en continu sans aération. Comporte 40 réservoirs flottants en fibre de verre; enlèvement des déchets solides par un système à double drains; dépôt et stockage sur place.

2B Comme précédemment, mais avec aération dans les réservoirs; comporte 24 réservoirs.
2C Comme précédemment, mais avec injection d'oxygène liquide. Comporte 12 réservoirs.
3C Futur système à sacs, flexible, circulation d'eau en continu et injection d'oxygène liquide. Comporte 20 sacs.
4A Systèmes terrestres à circulation d'eau en continu avec aération sur terrain en pente. Comporte 38 réservoirs de béton.
4B Comme précédemment, mais avec réservoirs installés au bas de la pente.
4C Comme précédemment, mais avec injection d'oxygène liquide. Comporte 24 réservoirs de béton.
4D Comme précédemment, mais avec filtration mécanique pour concentrer les déchets.
4E Système terrestre à recirculation à 98 % inspiré du concept Aqua Optima avec 21 unités.

Tableau 2 : Caractéristiques des sites et options de traitement pour dix systèmes destinés à produire 2 500 tonnes de saumons atlantiques sur deux ans.

Type de système	**Netpen**	**Systèmes de confinement**				**Systèmes avec réservoir**				
		Rigides			Souples	Circulation continue				Recirc.
Numéro d'identification du système	1a	2a	2b	2c	3c	4a	4b	4c	4d	4e
Caractéristiques du site										
Alimentation électrique du réseau						X	X	X	X	X
Accès routier						X	X	X	X	X
Habitation sur le site	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Élevage de poissons										
Lot unique	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Élevage séquentiel										X
Source d'eau										
De la zone de surface (0-30 m)	X									
D'une profondeur précise (pompée)		X	X	X	X	X	X	X	X	X
Prise profonde (pompée)										
Composants pour le traitement										
Pompage		X	X	X	X	X	X	X	X	X
Aération de l'influent – colonne						X	X			
Aération de l'influent – injection d'oxygène								X	X	
Aération dans réservoir			X					X	X	
Injection d'oxygène pur dans réservoir				X	X					
Aération latérale – oxygène pur										X
Enlèvement du dioxyde de carbone										X
Collecte des solides dans les réservoirs		X	X	X	X			X	X	
Traitement des solides (3-5 % de solides)		X	X	X	X	X	X	X	X	X
Concentration des solides (15-20 % de solides)									X	X
Filtration biologique										X
Désinfection de l'effluent										X
Désinfection latérale										X
Désinfection de l'influent										X

Selon ce document, les systèmes 2a à 3c dépendent d'une génératrice diesel – comme ce serait le cas en Colombie-Britannique pour la transformation de sites actuellement visés par des baux de salmoniculture; toutefois, il existe encore des possibilités non quantifiées pour les systèmes d'élevage en circuit fermé flottants à des sites où le réseau électrique est accessible.

Les interactions potentielles entre l'aquaculture et l'environnement associées au mouvement des parasites et des agents pathogènes, aux échappées de poissons, à la prédation par les mammifères et les oiseaux, à la gestion des déchets solides et solubles et à la qualité de l'eau (à savoir les concentrations d'oxygène dissous et de dioxyde de carbone) ont été comparées pour les dix systèmes. Aucun des systèmes proposés n'est entièrement confiné – coupé de l'environnement extérieur –, et même celui qui offre le meilleur confinement (système 4e)

présente des interactions avec l'environnement, y compris le rejet de déchets solides et d'eau. Selon les facteurs de risque qualitatifs, les installations terrestres d'élevage intensif à recirculation (système 4e offrent le plus grand degré de confinement, suivies par les installations terrestres à circulation d'eau continue (systèmes 4a – 4d), les systèmes à réservoir flottant à parois rigides (systèmes 2a – 2c), les installations avec réservoir flottant à parois souples (système 3c) et les installations avec enclos en filet classiques (système 1a).

Le risque le plus élevé d'interaction négative avec l'environnement semble être associé au rejet potentiel d'agents pathogènes et/ou de parasites par les systèmes de production aquicoles; toutefois, même ces risques ont été considérés comme étant « modérés » pour l'ensemble des systèmes. Les échappées potentielles de poissons sont également associées à un risque modéré dans le cas des enclos en filet (système 1a) et dans le cas du système avec réservoir flottant à parois souples (système 3c). Tous les autres facteurs de risque sont considérés comme étant soit « faibles » ou « négligeables ».

Dans le présent document, on a produit une matrice d'évaluation du risque théorique à l'aide d'hypothèses sur le degré de risque et la probabilité d'occurrences d'événements associés à plusieurs facteurs reliés à la production aquicole susceptibles d'avoir des impacts importants sur les poissons d'élevage ainsi que sur l'environnement, comme l'exposition aux agents pathogènes, les échappées de poissons et la gestion des déchets solides. Les hypothèses formulées sur le degré de risque et la probabilité d'occurrences et utilisées dans l'analyse n'étaient pas fondées sur un consensus atteint au sein du groupe; elles sont plutôt des interprétations de l'auteur du rapport. L'auteur reconnaît que l'évaluation du risque produite ne reflète que la valeur potentielle de cet outil et qu'un consensus général parmi les intervenants est nécessaire pour mener une véritable évaluation du risque fondée sur des valeurs qui pourrait être appliquée au cadre décisionnel.

Il est important de noter que les « conséquences générales » et les « probabilités » peuvent varier d'un intervenant à l'autre; par conséquent, une plus vaste participation et un meilleur consensus de la part de l'ensemble des intervenants concernés doivent transparaître dans toute évaluation du risque. Le modèle d'évaluation du risque dont il est question dans le présent examen constitue une approche pour comparer les dix systèmes salmonicoles; toutefois, de nombreux autres facteurs décisionnels pertinents ne sont pas pris en considération. Par exemple, les questions associées aux aspects socio-économiques de la salmoniculture en Colombie-Britannique, à la justice sociale, à l'esthétique (c.-à-d. la pollution visuelle), au bien-être des animaux, aux investissements et aux dépenses d'exploitation ainsi qu'à la consommation d'énergie ne sont pas passées en revue et ne sont pas prises en considération dans l'évaluation comparative. En outre, même si l'on laisse sous-entendre que plusieurs des systèmes pourraient permettre l'élimination des déchets solides, le présent examen n'approfondit pas le caractère pratique des techniques et des pratiques pour éliminer les biosolides marins, un enjeu important qu'il ne faut pas oublier.

L'information présentée dans le rapport est destinée à des évaluations comparatives des besoins énergétiques totaux et du degré d'investissement et des revenus associés aux dix systèmes qui seront présentées dans des rapports distincts et subséquents.

6. À la lumière des conclusions des cinq documents ci-devant, conceptualiser une série de systèmes intégrés qui pourraient être utilisés dans un projet pilote ou un élevage modèle

La présente section compare les besoins en ressources et en énergie de cinq types de systèmes de production : a) enclos en filet classique; b) systèmes d'élevage en circuit fermé à parois rigides; c) systèmes d'élevage en circuit fermé à parois souples; d) système terrestre à circulation d'eau continue; e) système terrestre à eau recyclée. La capacité de production présumée est de 2 500 tonnes/cycle pour tous les systèmes. À l'exception du système terrestre à recirculation (4E), l'analyse présume des cycles d'élevage par lot, suivis d'une période de vacance de 60 jours. Un modèle de production détaillé a été élaboré pour estimer la consommation d'aliments, la croissance, la production de déchets, les rejets de déchets, le débit d'eau requis, la puissance de pompage nécessaire et les apports d'oxygène requis. En raison du manque de données publiées sur le taux de croissance, la mortalité et l'indice de transformation alimentaire dans les systèmes d'élevage en circuit fermé et les systèmes terrestres, il a fallu établir des hypothèses sur la variation de ces paramètres dans les différents systèmes. Ces hypothèses peuvent avoir un impact important sur le rendement des divers scénarios d'élevage. Il faut effectuer d'autres analyses en ce qui concerne les hypothèses, y compris une analyse de sensibilité pour évaluer l'importance des paramètres d'entrée, particulièrement l'hypothèse d'un indice de transformation alimentaire constant; une analyse du cycle de vie de l'équipement, y compris des défaillances du matériel et du déclassement de celui-ci, des détails sur les exigences en matière de transport; l'efficacité énergétique de l'équipement d'alimentation d'urgence; la prise en considération des périodes de vacance de chaque système.

La consommation d'énergie pour ces dix scénarios d'élevage a été évaluée pour ce qui est de l'énergie consommée directement et indirectement ainsi que de l'énergie utilisée pour le transport. La consommation d'énergie pour l'alimentation, l'entretien, le pompage, le traitement de l'eau, l'aération, la régulation des températures et le transport est estimée. La contribution des capitaux immobilisés est attribuée à chaque option en fonction de la masse d'acier, d'aluminium, de plastiques et de bois, de la durée de vie prévue et de la densité énergétique. La biomasse des gaz à effet de serre est estimée à partir de la consommation énergétique de chaque composant et de facteurs d'émission de gaz à effet de serre. Les paramètres de rendement clés comprennent a) la consommation d'énergie, b) les émissions de gaz à effet de serre, c) les rejets de solides et d'éléments nutritifs, d) l'utilisation de l'eau, e) la superficie d'eau et de terre requise et f) l'efficacité énergétique globale.

Pour chaque ferme, l'énergie totale utilisée varie de 199 à 1 576 TJ/cycle. Le total des émissions de gaz à effet de serre varie de 11 000 à 104 000 tonnes/cycle. La quantité de solides/cycle varie de 57 000 kg pour les systèmes à eau recyclée à 1 067 000 kg pour les enclos en filet classiques.

Sur le plan de l'efficacité énergétique, les trois systèmes ayant affichés le meilleur rendement en ce qui touche le pourcentage de l'énergie consommée transféré aux poissons récoltés sont l'enclos en filet classique (9,13 %), le système d'élevage en circuit fermé à parois souples et à injection d'oxygène pur (8,34 %) et le système d'élevage en circuit fermé à parois rigides et à injection d'oxygène pur (7,03 %). Le système terrestre aménagé sur une pente avec aération de l'influent a affiché la plus faible efficacité énergétique (1,22 %). Dans le cas du système affichant le meilleur rendement, les exigences énergétiques ont été les plus faibles pour le soutien des poissons et le traitement des déchets. Selon les rejets de solides et d'éléments nutritifs, le système à eau recyclée s'est révélé supérieur à l'ensemble des autres systèmes,

mais s'est classé 7e sur le plan de l'efficacité énergétique. Du côté des émissions de gaz à effet de serre, le rendement suit la trajectoire des cotes d'efficacité énergétique.

Le choix du « meilleur » système nécessitera vraisemblablement des compromis entre les divers paramètres de rendement. Le classement des dix solutions d'élevage, d'après les coûts en capitaux et d'exploitation, sera vraisemblablement assez différent des classements fondés sur l'énergie, l'eau et les émissions de gaz à effet de serre. Les importantes lacunes constatées dans les recherches et pouvant avoir une incidence sur les estimations de la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre dans un contexte de salmoniculture en milieu marin font l'objet de discussions.

L'alimentation et l'électricité représentent de 82 à 99 % du budget énergétique et de 74 à 95 % des émissions de gaz à effet de serre associées à la production. Aux États-Unis, l'élevage représente 18 % du coût en énergie dans l'industrie de l'alimentation, ce qui fait en sorte que ces effets peuvent être moins importants dans les budgets énergétiques totaux. Il est difficile d'établir un ordre de priorité au niveau de la consommation d'énergie, de la production de gaz à effet de serre et de la pollution (DBO, N et P); chaque facteur est fonction de l'emplacement.

Le document suppose qu'aucun des systèmes à circulation d'eau continue ne peut être raccordé au réseau électrique, ce qui peut ne pas être le cas si des sites appropriés sont trouvés. Toutefois, les coûts en capitaux des génératrices de secours doivent toujours être inclus. Le document ne traite pas du potentiel de production énergétique ou d'autres extrants provenant des déchets de poissons même si, sur une base énergétique liée au carbone, ces déchets pourraient combler une bonne partie des besoins énergétiques. L'analyse énergétique complète, fondée en partie sur la méthode de l'évaluation du cycle de vie, doit être passée en revue par des experts dans ce domaine.

Le document approfondit également la question des coûts énergétiques et des émissions de gaz à effet de serre associés aux divers scénarios modélisés, mais ne tient pas compte de la gamme complète des questions environnementales relevées dans la demande de propositions. La comptabilisation des coûts environnementaux est un domaine d'études établi et il faut procéder à cet exercice pour comprendre les impacts véritables de toutes ces approches. La comptabilisation des coûts environnementaux doit faire partie de toute analyse économique subséquente et pourrait entraîner d'importants changements dans le classement actuel des techniques.

Parmi les autres points considérés comme pertinents, mentionnons les suivants : 1) tous les systèmes doivent être munis de dispositifs de soutien de la vie d'urgence, sinon les compagnies d'assurance pourraient les refuser; 2) il faut comprendre pourquoi il faut utiliser des pompes plus coûteuses ayant une capacité de refoulement plus élevé avec les systèmes à parois rigides comparativement aux systèmes à parois souples; 3) la récupération de la chaleur pourrait contribuer à abaisser les coûts; 4) les coûts indirects des matériaux devraient comprendre l'énergie nécessaire pour leur élimination; 5) il faut mieux comprendre la formulation des aliments, un facteur potentiellement essentiel dans le calcul des coûts énergétiques; 6) l'emplacement des installations (accès aux marchés et au réseau électrique) pourrait avoir une incidence importante sur les coûts d'énergie associés au transport et à la production d'électricité; 7) une analyse du risque améliorerait notre compréhension des coûts; 8) les considérations socio-économiques et environnementales pourraient constituer des facteurs essentiels dans toute analyse future.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS EN MATIÈRE DE RECHERCHE

Il faut franchir un certain nombre d'étapes pour pouvoir évaluer de façon appropriée le rendement des propositions pour la salmoniculture en circuit fermé, dont les suivantes.

1. Examen de tout plan d'affaires proposé pour déterminer les objectifs, la justification et le plan de travail. Le plan d'affaires doit contenir des renseignements de base sur les promoteurs et une analyse de sensibilité des facteurs de marché, y compris les conditions d'exploitation moyennes et non optimales ainsi que les tendances des marchés mondiaux. Le plan d'affaires doit tenir compte des coûts véritables de l'exploitation et doit notamment fournir des preuves de la fiabilité du système, des dispositifs de secours et de l'utilisation de modèles d'affaires actuels et passés réalistes ainsi que de la prise en considération des impacts environnementaux.
2. Les propositions doivent être évaluées en fonction des prototypes exposés au tableau 2 et doivent préciser les caractéristiques de l'environnement et du site, la technique d'élevage, la source d'eau et les composants du traitement. Un programme de surveillance environnementale précis et exhaustif doit faire partie de toute proposition.
3. Les propositions doivent être évaluées en fonction du processus et des procédures utilisés dans l'analyse technique, y compris des aspects tels que la stabilité et l'intégrité structurales des enceintes, des systèmes d'amarrage et les processus de construction et de déclassement.
4. Les propositions doivent être évaluées en fonction des paramètres d'exploitation biologique en cause, lesquels doivent être exposés de façon explicite. Elles doivent décrire le processus qui sera utilisé pour atteindre ces conditions d'exploitation et contenir des détails sur la fiabilité du système, y compris les dispositifs de secours et l'utilisation appropriée de techniques et de pratiques de biosécurité.
5. Les propositions doivent être évaluées en fonction des pratiques de gestion, d'exploitation et d'élevage prévues.
6. Les propositions doivent indiquer de quelle façon le projet sera durable. Les facteurs à considérer peuvent inclure, entre autres choses, tous les coûts énergétiques, les émissions de gaz à effet de serre et les coûts environnementaux, évalués à l'aide de l'approche de la comptabilisation des coûts environnementaux.
7. Les propositions doivent être évaluées en fonction d'une analyse du risque détaillée ainsi que des coûts estimés et des impacts environnementaux prévus.
8. Toutes les propositions doivent prévoir un budget pour une équipe de surveillance et d'évaluation indépendante et distincte.
9. L'équipe d'évaluation doit publier à tous les trimestres et chaque année des rapports sur un site Web du gouvernement.

Recommandations en matière de recherche

Le présent processus du SCCS nous a permis de relever un certain nombre de priorités en matière de recherche pour les gouvernements, l'industrie et d'autres intervenants; il est à noter que ces priorités ne sont pas présentées dans un ordre quelconque.

Économie

1. Effectuer des recherches sur des techniques de pisciculture à recirculation éprouvées pour élever d'autres poissons que le saumon et déterminer si elles peuvent être appliquées de façon économique et pratique à la production de saumons à l'échelle

commerciale en C.-B. L'analyse doit par conséquent inclure une évaluation critique du potentiel de la salmoniculture en circuit fermé en eau douce et en eau saumâtre.

2. Étudier des sites potentiels où le raccordement au réseau électrique serait possible pour des systèmes à circulation d'eau continue (et des systèmes aquicoles à recirculation). Aux endroits où le réseau électrique n'est pas disponible, étudier les exigences en matière d'infrastructures et toute capacité excédentaire pouvant être disponible dans la région d'intérêt.
3. Trouver des méthodes pour établir le coût des services environnementaux de façon qu'une comparaison puisse être établie entre différents systèmes aquicoles et différentes formes de production d'aliments.
4. Mener une analyse de sensibilité pour clarifier les effets que peuvent avoir des changements dans les hypothèses principales sur le taux de croissance, la mortalité et l'indice de transformation alimentaire avec les différents concepts de systèmes d'élevage en circuit fermé.

Technique

1. Effectuer d'autres recherches dans le domaine des systèmes à sacs flottants et à circulation d'eau continue afin de voir si des défaillances mécaniques, matérielles et structurales connues peuvent être résolues.
2. L'efficacité énergétique des systèmes flottants à circulation d'eau continue est sensible à la capacité de refoulement et à l'efficacité des pompes. Une analyse technique doit être effectuée pour savoir comment concevoir et maintenir un rendement optimal et une fiabilité optimale. Le rendement des pompes actuelles à faible capacité de refoulement et à fort débit pour usage marin doit être documenté.
3. Documenter le rendement des systèmes d'aération diffuse et d'injection d'oxygène pur pour des applications marines à grande échelle.
4. Documenter le rendement des drains doubles et des systèmes de collecte et d'enlèvement des solides dans les installations d'élevage en circuit fermé de fort diamètre.
5. Il faut étudier davantage les techniques de réduction des concentrations d'agents pathogènes et leur application (p. ex., UV, ozone et filtration) dans les installations d'élevage en circuit fermé. Toutefois, le déploiement efficace d'une technique de désinfection (coûteuse) doit en premier lieu reposer sur l'identification des points de contrôle critiques, ce qui inclut l'identification de l'endroit où le mouvement des agents pathogènes a lieu (c.-à-d., influent ou effluent) et une évaluation du risque des agents pathogènes ou des maladies qui doivent véritablement faire l'objet de mesures d'atténuation.

Pisciculture, santé et bien-être

1. Déterminer le pH, les concentrations d'ammoniaque non ionisé et de CO_2 sécuritaires; déterminer le critère de concentration cumulative d'oxygène pour les applications marines avec aération diffuse et injection d'oxygène pur.
2. Documenter les impacts des faibles concentrations d'oxygène dissous sur la croissance, la mortalité et l'indice de transformation alimentaire.
3. Élaborer des critères de densité des élevages pour les installations en circuit fermé et les impacts sur le taux de croissance, la variation dans les familles, la mortalité et l'indice de transformation alimentaire. Il faut effectuer plus de recherches sur les réactions à de plus fortes densités dans les systèmes d'élevage en circuit fermé.
4. Élaborer un document pour discuter des principaux paramètres de la salmoniculture à partir de la perspective de vétérinaires spécialisés en aquaculture.
5. Explorer les possibilités de recourir à d'autres méthodes de gestion/contrôle dans les systèmes d'élevage en circuit fermé. Par exemple, prendre l'eau d'entrée à une plus grande profondeur peut contribuer à réduire le mouvement des poux de poisson et du

plancton nocif dans les enceintes; les mesures de biosécurité peuvent avoir un impact plus grand qu'avec les enclos en filet.

6. Étudier la fréquence des maladies associées aux agents pathogènes opportunistes (maladies de production) qui peuvent être en lien avec les pratiques d'élevage intensif en circuit fermé.
7. Il faut effectuer d'autres recherches sur l'effet du CO_2, de l'ammoniaque et des solides en suspension sur la croissance des poissons et sur les techniques à utiliser pour résoudre ces problèmes.
8. Il faut mener des recherches sur l'optimisation de la vélocité natatoire afin d'améliorer le taux de croissance et la transformation alimentaire. Cet aspect peut être confondu avec un effet de densité, la clarté de l'eau et d'autres conditions et doit faire l'objet d'autres recherches.
9. Évaluer les aspects du bien-être des animaux relatifs à la densité; toutefois, ce débat doit être pondéré en fonction des avantages potentiels de l'élevage de poissons à des densités plus faibles. Les lignes directrices américaines sur la densité sont inférieures à 80 kg/m^3.
10. La sélection des souches de saumon atlantique est une stratégie préventive reconnue pour réduire l'incidence des maladies et le stress et doit être étudiée davantage.

Déchets et autres effets environnementaux/extrants/intrants

1. Définie les impacts environnementaux particuliers des systèmes à enclos en filet et des diverses techniques d'élevage en circuit fermé afin de clarifier quels problèmes peuvent être réglés avec l'élevage en circuit fermé.
2. Élaborer une technique économique pour le traitement et la récupération ou l'élimination des déchets de poissons élevés en milieu salin.
3. Effectuer des recherches sur le potentiel de récupération des déchets des poissons, y compris les individus morts, par la production de biogaz.

POUR DE PLUS AMPLES RENSEIGNEMENTS

Communiquer avec : Michael Chadwick
Pêches et Océans Canada
Centre des pêches du Golfe
C.P. 5030
Moncton, Nouveau-Brunswick
E1C 9B6

Tél. : (506) 851-6206

Fax : (506) 851-2387

Courriel : michael.chadwick@dfo-mpo.gc.ca

Ce rapport est disponible auprès du

Secrétariat canadien de consultation scientifique
Région de la capitale nationale
Pêches et Océans Canada
200, rue Kent
Ottawa, Ontario
K1A 0E6

Téléphone: (613) 990-0293
Télécopieur : (613) 954-0807
Courriel : CSAS@dfo-mpo.gc.ca
Adresse Internet : www.dfo-mpo.gc.ca/csas

ISSN 1480-4921 (imprimé)
© Sa majesté la Reine du Chef du Canada, 2008

An English version is available upon request at the above address.

LA PRÉSENTE PUBLICATION DOIT ÊTRE CITÉE COMME SUIT :

MPO. 2008. Évaluation des techniques potentielles de salmoniculture en circuit fermé et en eau de mer. Secr. can. de consult. sci. du MPO. Avis scientifique 2008/001.